L'univers inflationnaire autoreproducteur

Des versions récentes du scénario inflationnaire décrivent l'univers comme une fractale auto-génératrice qui fait bourgeonner d'autres univers inflationnaires.[1]

par Andrei Linde[2]

Si mes collègues et moi avons raison, nous dirons peut-être bientôt adieu à l'idée selon laquelle notre univers serait une unique boule de feu créée lors du *Big Bang*. Nous explorons une nouvelle théorie fondée sur une idée vieille de quinze ans, selon laquelle l'univers aurait traversé une phase d'inflation. Durant cette période, la théorie affirme que le cosmos devint exponentiellement vaste en une fraction infinitésimale de seconde. À la fin de cette période, l'univers poursuivit son évolution conformément au modèle du *Big Bang*. À mesure que les chercheurs affinèrent ce scénario inflationnaire, ils découvrirent certaines conséquences surprenantes. L'une d'elles constitue un changement fondamental dans la manière de concevoir le cosmos. Des versions récentes de la théorie inflationnaire affirment qu'au lieu d'être une boule de feu en expansion, l'univers est une immense fractale en croissance. Il est constitué de nombreuses bulles inflationnaires qui produisent de nouvelles bulles, lesquelles produisent à leur tour encore d'autres bulles, et ainsi de suite à l'infini.

Les cosmologistes n'ont pas inventé arbitrairement cette vision plutôt singulière de l'univers. Plusieurs chercheurs, d'abord en Russie puis aux États-Unis, ont proposé l'hypothèse inflationnaire qui en constitue le fondement. Nous l'avons fait afin de résoudre certaines complications laissées en suspens par l'ancienne idée du *Big Bang*. Sous sa forme standard, la théorie du *Big Bang* soutient que l'univers est né il y a environ quinze milliards d'années à partir d'une singularité cosmologique — un état dans lequel la température et la densité étaient infiniment élevées. Bien entendu, on ne peut réellement parler en termes physiques de quantités infinies. On suppose généralement que les lois actuelles de la physique ne s'appliquaient pas alors. Elles ne commencèrent à s'exercer qu'après que la densité de l'univers fut descendue au-dessous de la densité dite de Planck, qui vaut environ 10^{94} grammes par centimètre cube.

À mesure que l'univers se dilatait, il se refroidissait progressivement. Les vestiges du feu cosmique primordial nous entourent encore sous la forme du rayonnement de fond micro-onde. Ce rayonnement indique que la température de l'univers est tombée à 2,7 kelvins. La découverte, en 1965, de ce rayonnement de fond par Arno A. Penzias et Robert W. Wilson des *Bell Laboratories* constitua la preuve décisive qui établit la

---

[1] Linde, A. (1994). The Self-Reproducing Inflationary Universe. *Scientific American*, 271(5), 48–55. Traduction de l'anglais par Éric Loonis.

[2] Andrei Linde est l'un des initiateurs de la théorie inflationnaire. Après avoir obtenu son diplôme à l'université de Moscou, il reçut son doctorat à l'Institut de physique P. N. Lebedev de Moscou, où il commença à explorer les liens entre la physique des particules et la cosmologie. Il devint professeur de physique à l'université Stanford en 1990. Il vit à Stanford avec son épouse, Renata Kallosh (également professeure de physique à Stanford), ainsi qu'avec ses fils, Dmitri et Alex. Outre ses réflexions théoriques sur la naissance du cosmos, Linde s'adonne aussi à des numéros de scène tels que la prestidigitation, l'acrobatie et l'hypnose.

théorie du Big Bang comme théorie cosmologique dominante. La théorie du Big Bang expliquait également les abondances d'hydrogène, d'hélium et des autres éléments présents dans l'univers.

À mesure que les chercheurs développaient cette théorie, ils mirent au jour des problèmes complexes. Par exemple, la théorie standard du *Big Bang*, couplée à la théorie moderne des particules élémentaires, prédit l'existence de nombreuses particules supermassives portant une charge magnétique — c'est-à-dire des objets ne possédant qu'un seul pôle magnétique. Ces monopôles magnétiques auraient une masse typique égale à 10^{16} fois celle du proton, soit environ 0,00001 milligramme. Selon la théorie standard du *Big Bang*, les monopôles auraient dû apparaître très tôt dans l'évolution de l'univers et devraient aujourd'hui être aussi abondants que les protons. Dans ce cas, la densité moyenne de matière dans l'univers serait environ 10^{15} fois supérieure à sa valeur actuelle, qui est d'environ 10^{-29} gramme par centimètre cube.

Cette énigme, ainsi que d'autres, contraignirent les physiciens à examiner plus attentivement les hypothèses fondamentales sur lesquelles reposait la théorie cosmologique standard. Et nous en trouvâmes beaucoup de hautement suspectes. Je vais passer en revue six des plus difficiles. Le premier problème, et le principal, est l'existence même du *Big Bang*. On peut se demander : qu'y avait-il avant ? Si l'espace-temps n'existait pas encore, comment tout aurait-il pu surgir du néant ? Qu'est apparu en premier : l'univers ou les lois déterminant son évolution ? Expliquer cette singularité initiale — où et quand tout commença — demeure encore le problème le plus insoluble de la cosmologie moderne.

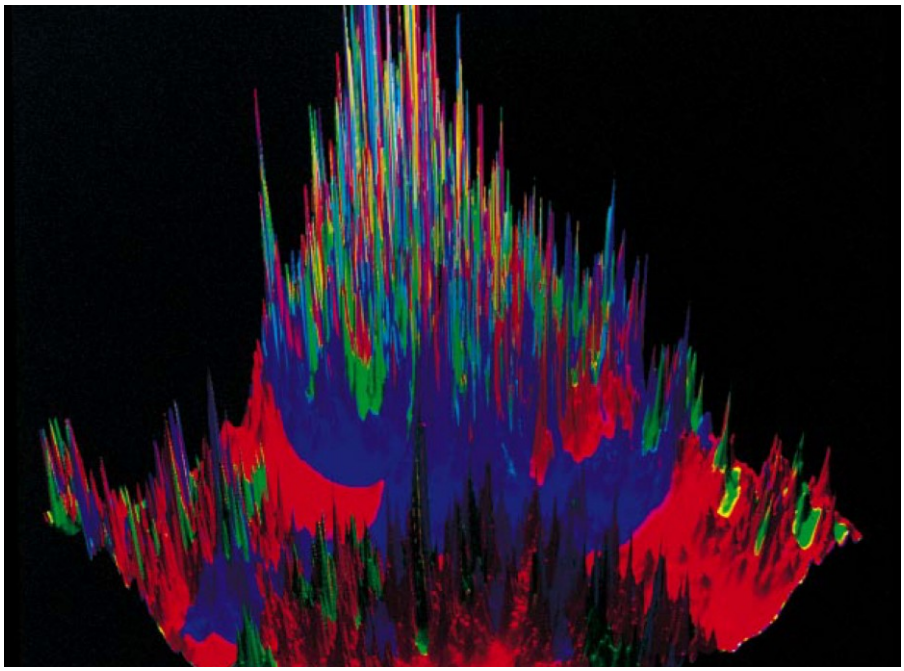
Une deuxième difficulté concerne la platitude de l'espace. La relativité générale suggère que l'espace pourrait être fortement courbé, avec un rayon typique de l'ordre de la longueur de Planck, soit 10^{-33} centimètre. Nous observons cependant que notre univers est pratiquement plat à l'échelle de 10^{28} centimètres, qui correspond au rayon de la partie observable de l'univers. Ce résultat observationnel diffère des attentes théoriques de plus de soixante ordres de grandeur.

Une divergence semblable entre théorie et observations concerne la taille de l'univers. Les études cosmologiques montrent que notre région de l'univers contient au moins 10^{88} particules élémentaires. Mais pourquoi l'univers est-il si vaste ? Si l'on considère un univers de taille initiale typique donnée par la longueur de Planck et de densité initiale typique égale à la densité de Planck, alors, en utilisant la théorie standard du *Big Bang*, on peut calculer combien de particules élémentaires un tel univers pourrait contenir. La réponse est plutôt inattendue : l'univers entier ne devrait être assez grand que pour contenir une seule particule élémentaire — ou tout au plus une dizaine. Il serait incapable d'abriter ne serait-ce qu'un seul lecteur de *Scientific American*, lequel est constitué d'environ 10^{29} particules élémentaires. Manifestement, quelque chose ne va pas dans cette théorie.

Le quatrième problème concerne la synchronisation de l'expansion. Sous sa forme standard, la théorie du *Big Bang* suppose que toutes les régions de l'univers commencèrent à se dilater simultanément. Mais comment toutes les différentes parties de l'univers auraient-elles pu synchroniser le début de leur expansion ? Qui en donna l'ordre ?

Cinquièmement, il y a la question de la répartition de la matière dans l'univers. À très grande échelle, la matière est distribuée avec une remarquable uniformité. Sur plus de dix milliards d'années-lumière, cette répartition s'écarte de l'homogénéité

parfaite de moins d'une partie sur 10 000. Pendant longtemps, personne n'avait la moindre idée de la raison pour laquelle l'univers était si homogène. Mais ceux qui manquent d'idées ont parfois des principes. L'une des pierres angulaires de la cosmologie standard était le « principe cosmologique », qui affirme que l'univers doit être homogène. Cette hypothèse n'aide toutefois pas beaucoup, car l'univers présente d'importantes déviations à l'homogénéité, à savoir les étoiles, les galaxies et les autres agglomérations de matière. Nous devons donc expliquer pourquoi l'univers est si uniforme à grande échelle tout en proposant un mécanisme capable de produire les galaxies.



Univers autoreproducteur dans une simulation informatique : *il est constitué de domaines exponentiellement vastes, chacun possédant des lois physiques différentes (représentées par des couleurs). Les pics acérés correspondent à de nouveaux « Big Bangs » ; leur hauteur représente la densité d'énergie de l'univers en ces régions. Au sommet des pics, les couleurs fluctuent rapidement, indiquant que les lois de la physique n'y sont pas encore stabilisées. Elles ne se fixent que dans les vallées, dont l'une correspond au type d'univers*[3] *dans lequel nous vivons actuellement.*

Enfin, il existe ce que j'appelle le problème de l'unicité. Albert Einstein en résuma l'essence lorsqu'il déclara : « Ce qui m'intéresse vraiment, c'est de savoir si Dieu avait le moindre choix dans la création du monde. » En effet, de légères modifications des constantes physiques de la nature auraient pu conduire l'univers à évoluer d'une manière complètement différente. Par exemple, de nombreuses théories populaires des particules élémentaires supposent que l'espace-temps possédait à l'origine bien plus de quatre dimensions (trois spatiales et une temporelle). Afin de faire coïncider les calculs théoriques avec le monde physique dans lequel nous vivons, ces modèles affirment que les dimensions supplémentaires ont été « compactifiées », c'est-à-dire réduites à une très petite taille, puis dissimulées. Mais on peut se demander pourquoi cette compactification s'est arrêtée à quatre dimensions plutôt qu'à deux ou cinq.

[3] En 1994, le concept de « multivers » reste encore implicite chez Linde et d'autres auteurs scientifiques (NDT).

De plus, la manière dont les autres dimensions se replient est importante, car elle détermine les valeurs des constantes de la nature ainsi que les masses des particules. Dans certaines théories, la compactification peut se produire de milliards de façons différentes. Il y a quelques années encore, il aurait semblé assez dépourvu de sens de demander pourquoi l'espace-temps possède quatre dimensions, pourquoi la constante gravitationnelle est si faible ou pourquoi le proton est presque 2 000 fois plus lourd que l'électron. Aujourd'hui, les développements de la physique des particules élémentaires rendent la réponse à ces questions cruciale pour comprendre la structure de notre monde.

Tous ces problèmes (et d'autres que je n'ai pas mentionnés) sont extrêmement déroutants. C'est pourquoi il est encourageant de constater que beaucoup de ces énigmes peuvent être résolues dans le cadre de la théorie de l'univers inflationnaire autoreproducteur.

Les caractéristiques fondamentales du scénario inflationnaire trouvent leur origine dans la physique des particules élémentaires. J'aimerais donc vous emmener pour une brève excursion dans ce domaine — en particulier vers la théorie unifiée des interactions faibles et électromagnétiques. Ces deux forces s'exercent par l'intermédiaire de particules. Les photons transmettent la force électromagnétique ; les particules W et Z sont responsables de la force faible. Mais alors que les photons sont dépourvus de masse, les particules W et Z sont extrêmement massives. Afin d'unifier les interactions faibles et électromagnétiques malgré les différences évidentes entre les photons et les particules W et Z, les physiciens ont introduit ce que l'on appelle des champs scalaires.

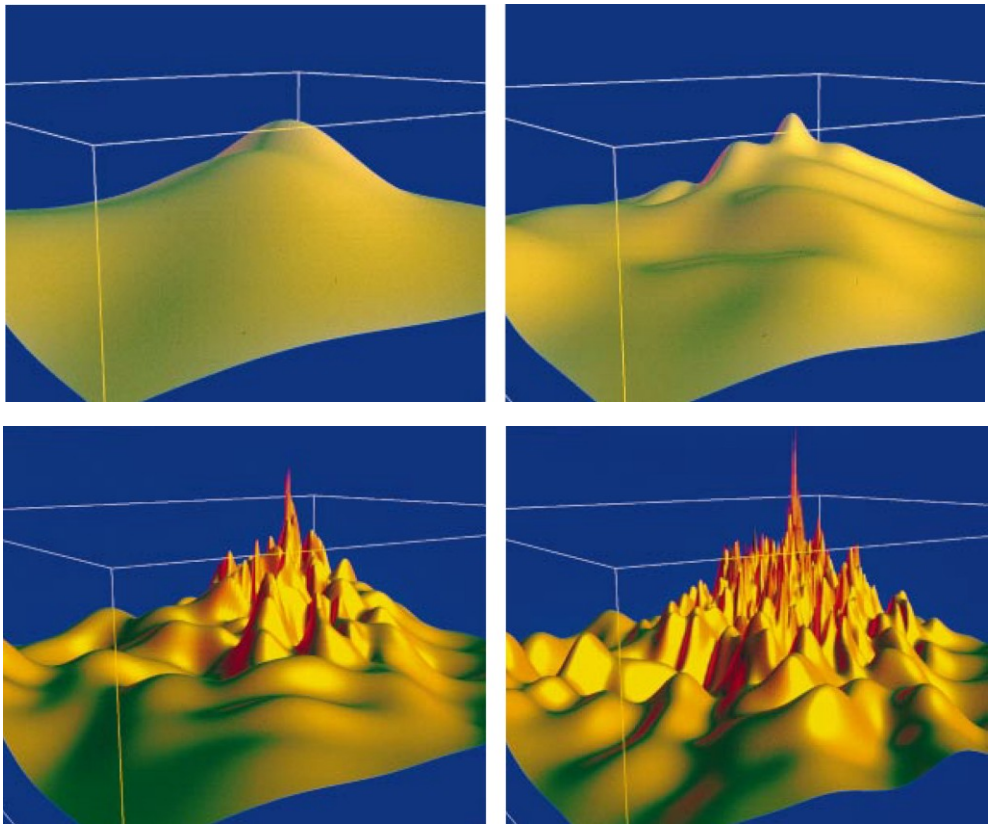
Bien que les champs scalaires ne fassent pas partie de notre expérience quotidienne, il en existe un analogue familier : le potentiel électrostatique — la tension dans un circuit électrique en est un exemple. Les champs électriques n'apparaissent que si ce potentiel est inégalement réparti, comme entre les pôles d'une batterie, ou si le potentiel varie au cours du temps. Si l'univers entier possédait le même potentiel électrostatique, disons 110 volts, personne ne le remarquerait ; ce potentiel semblerait n'être qu'un autre état du vide. De la même manière, un champ scalaire constant ressemble à un vide : nous ne le voyons pas, même si nous sommes entièrement baignés en lui.

Ces champs scalaires remplissent l'univers et manifestent leur présence en modifiant les propriétés des particules élémentaires. Si un champ scalaire interagit avec les particules W et Z, celles-ci deviennent massives. Les particules qui n'interagissent pas avec le champ scalaire, comme les photons, demeurent légères.

Pour décrire la physique des particules élémentaires, les physiciens partent donc d'une théorie dans laquelle toutes les particules sont initialement légères et dans laquelle il n'existe aucune différence fondamentale entre les interactions faibles et électromagnétiques. Cette différence n'apparaît que plus tard, lorsque l'univers se dilate et se remplit de divers champs scalaires. Le processus par lequel les forces fondamentales se séparent est appelé brisure de symétrie. La valeur particulière du champ scalaire qui apparaît dans l'univers est déterminée par la position du minimum de son énergie potentielle.

Les champs scalaires jouent un rôle crucial en cosmologie autant qu'en physique des particules. Ils fournissent le mécanisme à l'origine de l'inflation rapide de l'univers. En effet, selon la relativité générale, l'univers se dilate à une vitesse approximativement proportionnelle à la racine carrée de sa densité. Si l'univers était

rempli de matière ordinaire, alors sa densité diminuerait rapidement au fur et à mesure de l'expansion cosmique. Par conséquent, l'expansion de l'univers ralentirait rapidement à mesure que sa densité décroîtrait. Mais, en raison de l'équivalence entre masse et énergie établie par Albert Einstein, l'énergie potentielle du champ scalaire contribue elle aussi à l'expansion. Dans certains cas, cette énergie décroît beaucoup plus lentement que la densité de la matière ordinaire.



Évolution d'un champ scalaire : *elle conduit à la formation de nombreux domaines inflationnaires, comme le révèle cette séquence d'images générées par ordinateur. Dans la majeure partie de l'univers, le champ scalaire décroît (représenté par des dépressions et des vallées). En d'autres régions, des fluctuations quantiques provoquent l'augmentation du champ scalaire. Dans ces endroits, représentés sous forme de pics, l'univers se dilate extrêmement rapidement, ce qui entraîne la création de régions inflationnaires. Nous vivons dans l'une des vallées, où l'espace n'est plus en phase d'inflation.*

La persistance de cette énergie peut conduire à une phase d'expansion extrêmement rapide — ou inflation — de l'univers. Cette possibilité apparaît même si l'on considère la version la plus simple de la théorie d'un champ scalaire. Dans cette version, l'énergie potentielle atteint un minimum lorsque le champ scalaire s'annule. Dans ce cas, plus le champ scalaire est élevé, plus l'énergie potentielle est grande. Selon la théorie gravitationnelle d'Albert Einstein, l'énergie du champ scalaire devait provoquer une expansion extrêmement rapide de l'univers. Cette expansion ralentit lorsque le champ scalaire atteignit le minimum de son énergie potentielle.

Une manière d'imaginer cette situation consiste à représenter une balle roulant le long des parois d'un grand bol [*voir illustration du haut page 12*]. Le fond du bol représente le minimum d'énergie. La position de la balle correspond à la valeur du champ scalaire. Bien entendu, les équations décrivant le mouvement du champ

scalaire dans un univers en expansion sont un peu plus complexes que celles d'une balle dans un bol vide. Elles contiennent un terme supplémentaire correspondant à une friction, ou viscosité. Cette friction revient à imaginer que le bol est rempli de mélasse. La viscosité de ce liquide dépend de l'énergie du champ : plus la balle se trouve haut dans le bol, plus le liquide est épais. Ainsi, si le champ était initialement très élevé, l'énergie diminuait extrêmement lentement.

Cette lente diminution de l'énergie du champ scalaire a une conséquence cruciale sur le taux d'expansion. La décroissance était si progressive que l'énergie potentielle du champ scalaire demeurait presque constante pendant que l'univers se dilatait. Ce comportement contraste fortement avec celui de la matière ordinaire, dont la densité décroît rapidement dans un univers en expansion. Grâce à l'énergie élevée du champ scalaire, l'univers continua à se dilater à une vitesse bien supérieure à celle prédite par les théories cosmologiques pré-inflationnaires. La taille de l'univers augmenta alors de manière exponentielle.

Cette phase d'inflation auto-entretenue et exponentiellement rapide ne dura pas longtemps. Sa durée put être aussi brève que 10^{-35} seconde. Une fois l'énergie du champ diminuée, la viscosité disparut presque entièrement, et l'inflation prit fin. Comme la balle atteignant le fond du bol, le champ scalaire commença à osciller autour du minimum de son énergie potentielle. En oscillant, le champ scalaire perdit de l'énergie, qu'il céda sous forme de particules élémentaires. Ces particules interagirent entre elles et finirent par atteindre une certaine température d'équilibre. À partir de ce moment-là, la théorie standard du *Big Bang* peut décrire l'évolution de l'univers.

La principale différence entre la théorie inflationnaire et l'ancienne cosmologie apparaît clairement lorsque l'on calcule la taille de l'univers à la fin de l'inflation. Même si l'univers, au début de l'inflation, était aussi petit que 10^{-33} centimètre, après 10^{-35} seconde d'inflation ce domaine atteignit une taille inimaginable. Selon certains modèles inflationnaires, cette taille peut atteindre $10^{10^{12}}$ centimètres — c'est-à-dire un 1 suivi d'un trillion de zéros. Ces nombres dépendent des modèles utilisés, mais dans la plupart des versions cette taille dépasse de nombreux ordres de grandeur celle de l'univers observable, qui est d'environ 10^{28} centimètres.

Cette expansion prodigieuse résout immédiatement la plupart des problèmes de l'ancienne théorie cosmologique. Notre univers apparaît lisse et homogène parce que toutes les inhomogénéités ont été étirées d'un facteur de $10^{10^{12}}$. La densité des monopôles primordiaux et d'autres « défauts » indésirables devient exponentiellement diluée. (Nous avons récemment découvert que les monopôles peuvent eux-mêmes entrer en inflation et ainsi se repousser effectivement hors de l'univers observable.) L'univers est devenu si vaste que nous n'en voyons aujourd'hui qu'une infime fraction. Voilà pourquoi, comme une petite région à la surface d'un énorme ballon gonflé, notre portion d'univers paraît plate. Voilà aussi pourquoi nous n'avons pas besoin d'exiger que toutes les régions de l'univers aient commencé à se dilater simultanément. Un seul domaine de taille minimale possible, de l'ordre de 10^{-33} centimètre, suffit amplement à produire tout ce que nous observons aujourd'hui.

La théorie inflationnaire n'a pas toujours semblé aussi simple sur le plan conceptuel. Les tentatives visant à obtenir une phase d'expansion exponentielle de l'univers ont une longue histoire. Malheureusement, en raison des barrières politiques, cette histoire n'est connue que partiellement des lecteurs américains.

La première version réaliste de la théorie inflationnaire fut proposée en 1979 par Alexei A. Starobinsky de l'Institut de physique théorique L. D. Landau de Moscou. Le modèle de Starobinsky provoqua une véritable sensation parmi les astrophysiciens russes et, pendant deux ans, il demeura le principal sujet de discussion de toutes les conférences consacrées à la cosmologie en Union soviétique. Son modèle était toutefois assez complexe (il reposait sur la théorie des anomalies en gravité quantique) et n'expliquait guère comment l'inflation pouvait réellement débuter.

En 1981, Alan H. Guth, du *Massachusetts Institute of Technology*, suggéra que l'univers chaud, à un certain stade intermédiaire, pouvait se dilater de manière exponentielle. Son modèle dérivait d'une théorie interprétant le développement de l'univers primitif comme une série de transitions de phase. Cette théorie avait été proposée en 1972 par David A. Kirzhnits et moi-même à l'Institut de physique P. N. Lebedev de Moscou. Selon cette idée, à mesure que l'univers se dilatait et se refroidissait, il se condensait sous différentes formes. La vapeur d'eau subit de telles transitions de phase. Lorsqu'elle se refroidit, la vapeur se condense en eau, laquelle, si le refroidissement se poursuit, devient de la glace.

L'idée de Guth supposait que l'inflation se produise lorsque l'univers se trouvait dans un état instable de surfusion. La surfusion est fréquente lors des transitions de phase ; par exemple, l'eau peut, dans certaines conditions, rester liquide en dessous de zéro degré Celsius. Bien entendu, l'eau surfondue finit par geler. Cet événement correspondrait à la fin de la période inflationnaire. L'idée d'utiliser la surfusion pour résoudre de nombreux problèmes de la théorie du Big Bang était exceptionnellement séduisante. Malheureusement, comme Guth lui-même le souligna, l'univers post-inflationnaire issu de son scénario devient extrêmement inhomogène. Après avoir étudié son modèle pendant un an, il y renonça finalement dans un article coécrit avec Erick J. Weinberg de l'université Columbia.

En 1982, j'introduisis le scénario dit du « nouvel univers inflationnaire », qu'Andreas Albrecht et Paul J. Steinhardt de l'université de Pennsylvanie découvrirent également par la suite [voir « The Inflationary Universe », par Alan H. Guth et Paul J. Steinhardt ; Scientific American, mai 1984]. Ce scénario éliminait les principaux problèmes du modèle de Guth. Mais il demeurait assez complexe et peu réaliste.

Ce n'est qu'un an plus tard que je réalisai que l'inflation constitue une propriété apparaissant naturellement dans de nombreuses théories des particules élémentaires, y compris dans le modèle le plus simple du champ scalaire évoqué plus haut. Il n'est nul besoin d'effets de gravité quantique, de transitions de phase, de surfusion, ni même de l'hypothèse standard selon laquelle l'univers était initialement chaud. Il suffit d'envisager tous les types et toutes les valeurs possibles des champs scalaires dans l'univers primordial, puis de vérifier si certains d'entre eux conduisent à l'inflation. Les régions où l'inflation ne se produit pas demeurent petites. Les domaines où l'inflation a lieu deviennent exponentiellement vastes et finissent par dominer le volume total de l'univers. Comme les champs scalaires peuvent prendre des valeurs arbitraires dans l'univers primordial, j'ai appelé ce scénario inflation chaotique.

À bien des égards, l'inflation chaotique est si simple qu'il est difficile de comprendre pourquoi cette idée n'a pas été découverte plus tôt. Je pense que la raison était purement psychologique. Les succès éclatants de la théorie du *Big Bang* avaient hypnotisé les cosmologistes. Nous supposions que l'univers entier avait été créé au même instant, qu'il était initialement chaud et que le champ scalaire se trouvait dès le départ proche du minimum de son énergie potentielle. Dès que nous avons commencé

à assouplir ces hypothèses, nous avons immédiatement constaté que l'inflation n'était pas un phénomène exotique invoqué par les théoriciens pour résoudre leurs difficultés. C'est un régime général qui apparaît dans une vaste classe de théories des particules élémentaires.

Le fait qu'un étirement extrêmement rapide de l'univers puisse résoudre simultanément de nombreux problèmes cosmologiques peut sembler trop beau pour être vrai. En effet, si toutes les inhomogénéités ont été étirées jusqu'à disparaître, comment les galaxies se sont-elles formées ? La réponse est que, tout en effaçant les inhomogénéités préexistantes, l'inflation en créa de nouvelles.

Ces inhomogénéités proviennent des effets quantiques. Selon la mécanique quantique, l'espace vide n'est pas totalement vide. Le vide est rempli de petites fluctuations quantiques. Ces fluctuations peuvent être considérées comme des ondes, ou des ondulations, dans les champs physiques. Ces ondes possèdent toutes les longueurs d'onde possibles et se déplacent dans toutes les directions. Nous ne pouvons pas les détecter, car elles ne vivent que très brièvement et demeurent microscopiques.

Dans l'univers inflationnaire, la structure du vide devient encore plus complexe. L'inflation étire rapidement les ondes. Lorsque leurs longueurs d'onde deviennent suffisamment grandes, les ondulations commencent à « ressentir » la courbure de l'univers. À ce moment-là, elles cessent de se déplacer en raison de la viscosité du champ scalaire (rappelons que les équations décrivant ce champ contiennent un terme de friction).

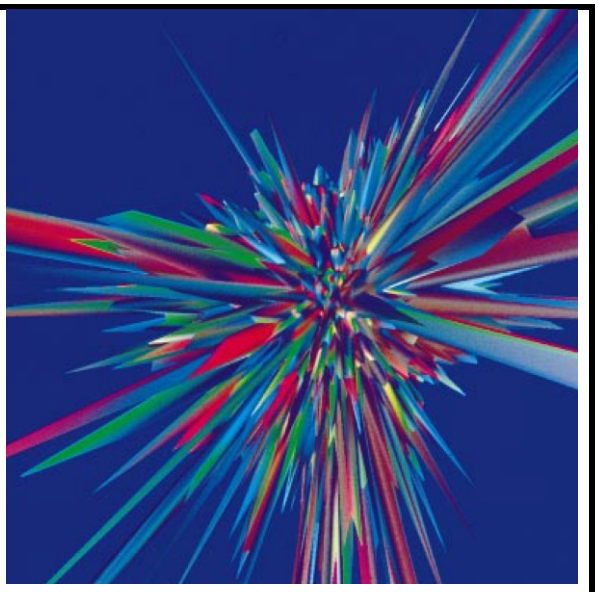
Les premières fluctuations à se figer sont celles dont les longueurs d'onde sont les plus grandes. À mesure que l'univers continue de se dilater, de nouvelles fluctuations sont étirées puis se figent à leur tour au-dessus des autres ondes déjà figées. À ce stade, on ne peut plus vraiment parler de fluctuations quantiques. La plupart de ces ondes possèdent désormais des longueurs d'onde extrêmement grandes. Comme elles ne se déplacent plus et ne disparaissent pas, elles augmentent la valeur du champ scalaire dans certaines régions et la diminuent dans d'autres, créant ainsi des inhomogénéités. Ces perturbations du champ scalaire engendrent les fluctuations de densité dans l'univers, lesquelles sont essentielles à la formation ultérieure des galaxies.

En plus d'expliquer de nombreuses caractéristiques de notre monde, la théorie inflationnaire formule plusieurs prédictions importantes et vérifiables. Premièrement, l'inflation prédit que l'univers doit être extrêmement plat. Cette platitude peut être vérifiée expérimentalement, car la densité d'un univers plat est reliée de manière simple à sa vitesse d'expansion. Jusqu'à présent, les données observationnelles sont compatibles avec cette prédiction.

Une autre prédiction testable concerne les perturbations de densité produites durant l'inflation. Ces perturbations influencent la distribution de la matière dans l'univers. De plus, elles peuvent être accompagnées d'ondes gravitationnelles. Les perturbations de densité comme les ondes gravitationnelles laissent leur empreinte sur le rayonnement de fond micro-onde. Elles rendent la température de ce rayonnement légèrement différente selon les régions du ciel. Cette non-uniformité correspond précisément à ce que le satellite *COsmic Background Explorer* (CVOBE) découvrit il y a deux ans, découverte ensuite confirmée par plusieurs autres expériences.

Bien que les résultats de COBE soient en accord avec les prédictions de l'inflation, il serait prématuré d'affirmer que COBE a confirmé la théorie inflationnaire. Mais il est certainement vrai que les résultats obtenus par le satellite, au niveau actuel de

précision, auraient pu réfuter définitivement la plupart des modèles inflationnaires — et cela ne s'est pas produit. À l'heure actuelle, aucune autre théorie ne peut expliquer simultanément pourquoi l'univers est si homogène tout en prédisant les « rides de l'espace » découvertes par COBE.



Un univers à la « Kandinsky » Une « explosion » du champ scalaire

Le huitième jour…

La nouvelle théorie cosmologique est très inhabituelle et, de manière compréhensible, peut être difficile à se représenter. L'une des principales raisons du succès de l'ancien scénario du *Big Bang* est qu'il est relativement facile d'imaginer l'univers comme un ballon se dilatant dans toutes les directions. Il est beaucoup plus difficile de saisir la structure d'un univers fractal éternellement autoreproducteur. Les simulations informatiques peuvent aider dans une certaine mesure. Je vais décrire ici quelques-unes de ces simulations, que j'ai réalisées avec mon fils Dmitri, aujourd'hui étudiant au *California Institute of Technology*.

Nous avons commencé nos simulations avec une tranche bidimensionnelle de l'univers remplie par un champ scalaire presque homogène. Nous avons calculé comment le champ scalaire évoluait en chaque point de notre domaine après le début de l'inflation. Puis nous avons ajouté à ce résultat des ondes sinusoïdales correspondant aux fluctuations quantiques qui se figent.

En appliquant continuellement cette procédure, nous avons obtenu une série de figures montrant la distribution du champ scalaire dans l'univers inflationnaire. (Pour des raisons de visualisation, l'ordinateur réduisait l'image originale au lieu d'agrandir les domaines en inflation.) Les images révélèrent que, dans la majeure partie du domaine initial, le champ scalaire décroît lentement [voir illustrations page 5]. Nous vivons dans une telle région de l'univers. De petites ondes figées au-dessus d'un champ presque homogène donnent finalement naissance aux perturbations de température du rayonnement de fond découvertes par le satellite COBE. D'autres parties de l'image montrent des montagnes en croissance, correspondant à d'immenses densités d'énergie conduisant à une inflation extrêmement rapide. Ainsi, chaque pic peut être interprété comme un nouveau « Big Bang » créant un « univers » inflationnaire.

La nature fractale de l'univers devint encore plus évidente lorsque nous ajoutâmes un second champ scalaire. Afin de rendre les choses encore plus intéressantes, nous avons considéré une théorie dans laquelle l'énergie potentielle de ce champ possède trois minima différents, représentés par des couleurs distinctes [voir illustration page 3]. Dans une tranche bidimensionnelle de l'univers, les couleurs proches des sommets des montagnes changent continuellement, indiquant que le champ scalaire saute rapidement d'un minimum d'énergie à un autre. Les lois de la physique n'y sont pas encore fixées. Mais dans les vallées, où le taux d'expansion est faible, les couleurs cessent de fluctuer. Nous vivons dans l'un de ces domaines. Les autres domaines sont extrêmement éloignés de nous. Les propriétés des particules élémentaires et les lois de leurs interactions changent lorsque l'on passe d'un domaine à un autre — il vaut mieux y réfléchir à deux fois avant de tenter la traversée.

Dans une autre série de figures, nous avons exploré la nature fractale de l'univers inflationnaire dans le cadre d'une théorie différente de la physique des particules. Décrire la signification physique de ces images est plus difficile. L'étrange motif coloré (à gauche) correspond à la distribution de l'énergie dans la théorie des axions (un type de champ scalaire). Nous l'avons appelé un univers « Kandinsky », en référence au célèbre peintre abstrait russe. Observés sous un autre angle, les résultats de nos simulations ressemblent parfois à des étoiles en explosion.

Nous avons réalisé la première série de ces simulations il y a plusieurs années, après avoir convaincu *Silicon Graphics* à Los Angeles de nous prêter pendant une semaine l'un de leurs ordinateurs les plus puissants. Mettre les simulations au point fut un travail difficile et ce n'est que le septième jour que nous terminâmes notre première série de calculs et vîmes pour la première fois toutes ces montagnes en croissance représentant les domaines inflationnaires. Nous pouvions voler entre elles et contempler notre univers dans les premiers instants de sa création. Nous regardions l'écran lumineux et nous étions heureux — nous avions vu que l'univers était bon ! Mais notre œuvre ne dura pas longtemps. Le huitième jour, nous rendîmes l'ordinateur, et le disque dur d'un gigaoctet de la machine tomba en panne, emportant avec lui l'univers que nous avions créé.

Nous poursuivons aujourd'hui nos recherches en utilisant d'autres méthodes (et un autre ordinateur *Silicon Graphics*). Mais il est possible de jouer à un jeu encore plus fascinant. Au lieu d'observer l'univers sur l'écran d'un ordinateur, on pourrait tenter de créer un univers en laboratoire. Une telle idée est, pour le moins, hautement spéculative. Mais certaines personnes (dont Alan H. Guth et moi-même) ne souhaitent pas écarter totalement cette possibilité. Il faudrait comprimer de la matière de manière à permettre aux fluctuations quantiques de déclencher l'inflation. De simples estimations dans le cadre du scénario de l'inflation chaotique suggèrent que moins d'un milligramme de matière pourrait suffire à initier un univers éternellement autoreproducteur.

Nous ignorons encore si un tel processus est réellement possible. La théorie des fluctuations quantiques susceptibles de conduire à la naissance d'un nouvel univers est extrêmement complexe. Et même s'il est possible de « cuire » de nouveaux univers, qu'en ferions-nous ? Pourrions-nous envoyer un message à leurs habitants, qui percevraient leur univers microscopique comme aussi vaste que nous percevons le nôtre ? Est-il concevable que notre propre univers ait été créé par un physicien-hacker ? Un jour peut-être, nous trouverons les réponses.

Néanmoins, nous devons garder l'esprit ouvert. Il reste possible que de nouvelles données observationnelles contredisent la cosmologie inflationnaire. Par exemple, si les observations nous apprennent que la densité de l'univers diffère considérablement de la densité critique correspondant à un univers plat, la cosmologie inflationnaire se trouvera confrontée à un véritable défi. (Il pourrait être possible de résoudre ce problème s'il se présentait, mais cela serait assez complexe.)

Une autre complication a une origine purement théorique. Les modèles inflationnaires reposent sur la théorie des particules élémentaires, et cette théorie elle-même n'est pas encore complètement établie. Certaines versions (notamment la théorie des supercordes) ne conduisent pas automatiquement à l'inflation. Faire émerger l'inflation à partir du modèle des supercordes pourrait nécessiter des idées radicalement nouvelles. Nous devons assurément poursuivre la recherche de théories cosmologiques alternatives. Beaucoup de cosmologistes estiment cependant que l'inflation, ou quelque chose de très proche, est absolument indispensable à la construction d'une théorie cosmologique cohérente. La théorie inflationnaire elle-même évolue à mesure que la physique des particules progresse rapidement. Parmi les nouveaux modèles figurent l'inflation étendue, l'inflation naturelle, l'inflation hybride et bien d'autres encore. Chacun de ces modèles possède des caractéristiques propres pouvant être testées par l'observation ou l'expérience. La plupart reposent néanmoins sur l'idée de l'inflation chaotique.

Nous arrivons ici à la partie la plus intéressante de notre histoire : la théorie d'un univers inflationnaire éternel et autoreproducteur. Cette théorie est assez générale, mais elle semble particulièrement prometteuse et conduit à ses conséquences les plus spectaculaires dans le cadre du scénario de l'inflation chaotique.

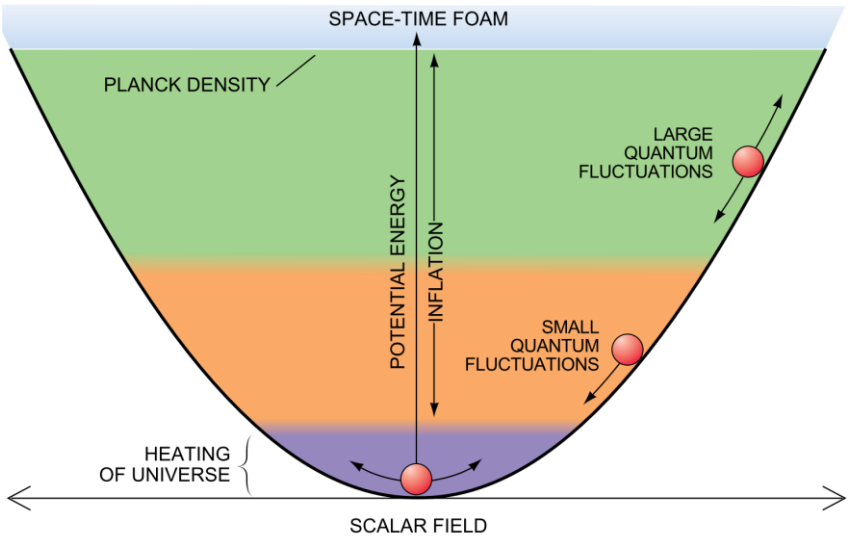
Comme je l'ai déjà mentionné, on peut visualiser les fluctuations quantiques du champ scalaire dans un univers inflationnaire sous forme d'ondes. Elles se déplacent d'abord dans toutes les directions possibles puis se figent les unes sur les autres. Chaque onde figée augmente légèrement le champ scalaire dans certaines régions de l'univers et le diminue dans d'autres.

Considérons maintenant les régions de l'univers où ces ondes nouvellement figées augmentent continuellement le champ scalaire. De telles régions sont extrêmement rares, mais elles existent bel et bien. Et elles peuvent être d'une importance capitale. Ces rares domaines de l'univers où le champ atteint une valeur suffisamment élevée commencent à se dilater exponentiellement à une vitesse sans cesse croissante. Plus le champ scalaire s'élève, plus l'univers se dilate rapidement. Très vite, ces rares domaines acquièrent un volume bien plus grand que les autres régions.

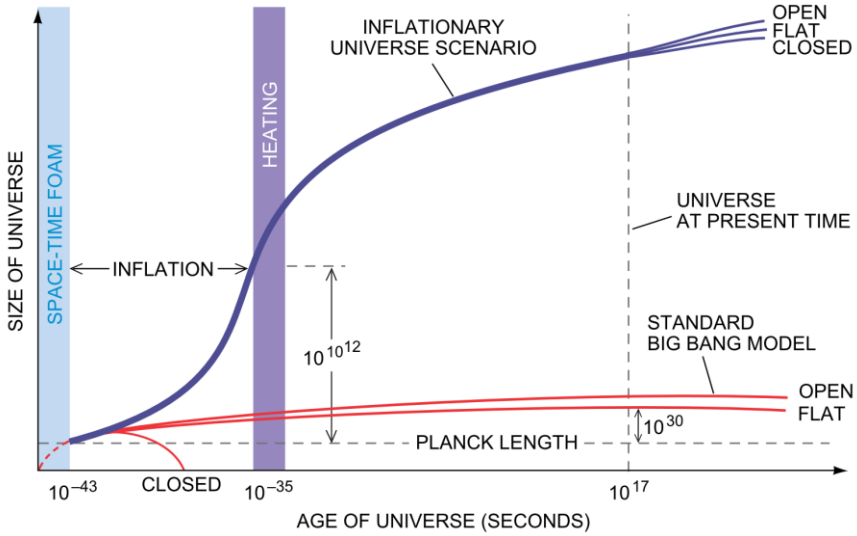
Cette théorie implique que, si l'univers contient au moins un domaine inflationnaire d'une taille suffisamment grande, il commence à produire sans cesse de nouveaux domaines inflationnaires. L'inflation peut prendre fin rapidement en chaque point particulier, mais de nombreux autres endroits continueront à se dilater. Le volume total de tous ces domaines croîtra sans limite. En substance, un univers inflationnaire fait bourgeonner d'autres bulles inflationnaires, lesquelles produisent à leur tour d'autres bulles inflationnaires (voir illustration page 14).

Ce processus, que j'ai appelé inflation éternelle, se poursuit comme une réaction en chaîne, produisant une structure fractale d'univers. Dans ce scénario, l'univers dans son ensemble est immortel. Chaque région particulière de l'univers peut provenir d'une singularité située quelque part dans le passé et peut finir dans une singularité

située quelque part dans le futur. Il n'existe cependant aucune fin à l'évolution de l'univers tout entier.



Champ scalaire dans un univers inflationnaire : *il peut être modélisé par une balle roulant le long des parois d'un bol. Le bord du bol correspond à la densité de Planck de l'univers, au-dessus de laquelle se trouve une « mousse » d'espace-temps, région de fortes fluctuations quantiques. Sous ce bord (en vert), les fluctuations sont plus faibles, mais peuvent encore assurer l'autoreproduction de l'univers. Si la balle reste dans le bol, elle pénètre dans une région moins énergétique (orange), où elle glisse très lentement vers le bas. L'inflation prend fin lorsque la balle approche du minimum d'énergie (violet), où elle oscille et réchauffe l'univers.*



Évolution de l'univers : *elle diffère selon le scénario de l'inflation chaotique ou la théorie standard du* Big Bang. *L'inflation augmente la taille de l'univers d'un facteur de $10^{10^{12}}$, si bien que des régions aussi petites que 10^{-33} centimètre (la longueur de Planck) dépassent la taille du rayon de l'univers observable, soit environ 10^{28} centimètres. L'inflation prédit également un espace essentiellement plat, dans lequel les lignes parallèles demeurent « parallèles ». (Dans un univers fermé, les lignes parallèles se croisent ; dans un univers ouvert, elles divergent finalement.) En revanche, l'expansion du* Big Bang *chaud originel n'aurait agrandi un univers de taille de Planck que jusqu'à 0,001 centimètre et conduirait à des prédictions différentes concernant la géométrie de l'espace.*

La situation concernant le véritable commencement est moins certaine. Il est possible que toutes les régions de l'univers aient été créées simultanément dans une singularité initiale du *Big Bang*. La nécessité d'une telle hypothèse n'est toutefois plus évidente. De plus, le nombre total de bulles inflationnaires sur notre « arbre cosmique » croît exponentiellement avec le temps. Ainsi, la plupart des bulles (y compris notre propre région de l'univers) se développent indéfiniment loin du tronc de cet arbre. Bien que ce scénario rende l'existence du *Big Bang* initial presque sans importance, à toutes fins pratiques on peut considérer le moment de formation de chaque bulle inflationnaire comme un nouveau « *Big Bang* ». De ce point de vue, l'inflation n'est pas une partie de la théorie du *Big Bang*, comme nous le pensions il y a quinze ans. Au contraire, le *Big Bang* est une partie du modèle inflationnaire.

En réfléchissant au processus d'autoreproduction de l'univers, on ne peut éviter d'établir des analogies, aussi superficielles soient-elles. On peut se demander : ce processus ne ressemble-t-il pas à ce qui nous arrive à tous ? Il y a quelque temps, nous sommes nés. Un jour, nous mourrons, et tout le monde de nos pensées, de nos sentiments et de nos souvenirs disparaîtra. Mais il y eut ceux qui vécurent avant nous, il y aura ceux qui vivront après nous, et l'humanité dans son ensemble, si elle est suffisamment intelligente, pourrait vivre encore très longtemps.

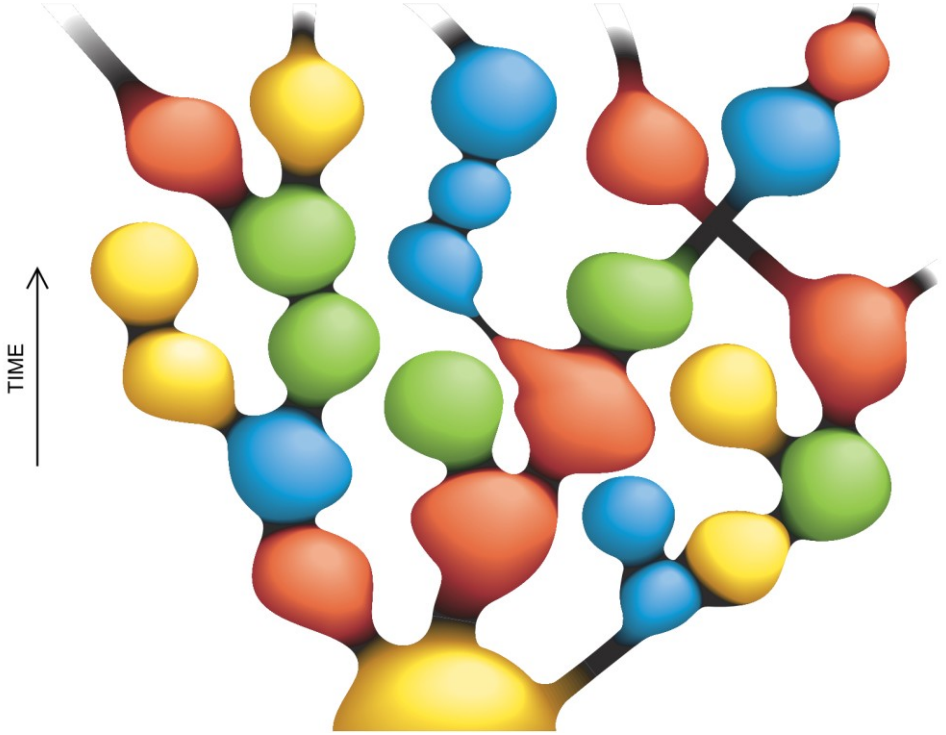
La théorie inflationnaire suggère qu'un processus similaire pourrait se produire avec l'univers. Il y a peut-être là une forme d'optimisme : même si notre civilisation disparaît, il existera ailleurs dans l'univers d'autres régions où la vie émergera encore et encore, sous toutes ses formes possibles.

Les choses pourraient-elles devenir encore plus étranges ? La réponse est oui. Jusqu'à présent, nous avons considéré le modèle inflationnaire le plus simple, avec un seul champ scalaire ne possédant qu'un unique minimum d'énergie potentielle. Or, les modèles réalistes de physique des particules élémentaires postulent l'existence de nombreux types de champs scalaires. Par exemple, dans les théories unifiées des interactions faible, forte et électromagnétique, il existe au moins deux autres champs scalaires. L'énergie potentielle de ces champs peut posséder plusieurs minima différents. Cela signifie qu'une même théorie peut admettre différents « états du vide », correspondant à différents types de brisure de symétrie entre les interactions fondamentales et, par conséquent, à différentes lois de la physique à basse énergie. (Les interactions entre particules à des énergies extrêmement élevées ne dépendent pas de la brisure de symétrie.)

De telles complexités des champs scalaires impliquent qu'après l'inflation, l'univers peut se diviser en domaines exponentiellement vastes possédant des lois différentes de la physique à basse énergie. Notons que cette division se produit même si l'univers tout entier a commencé initialement dans le même état, correspondant à un minimum particulier d'énergie potentielle. En effet, de grandes fluctuations quantiques peuvent provoquer la sortie des champs scalaires de leurs minima. Autrement dit, elles font « sauter » certaines balles hors de leurs bols vers d'autres bols. Chaque bol correspond à des lois alternatives d'interaction des particules. Dans certains modèles inflationnaires, les fluctuations quantiques sont si fortes que même le nombre de dimensions de l'espace et du temps peut changer.

Si ce modèle est correct, alors la physique seule ne peut fournir une explication complète de toutes les propriétés de notre région de l'univers. Une même théorie physique peut produire de vastes parties de l'univers possédant des propriétés diverses. Selon ce scénario, nous nous trouvons dans un domaine quadridimensionnel

doté de nos lois physiques particulières, non pas parce que les domaines de dimensionnalité différente ou aux propriétés alternatives seraient impossibles ou improbables, mais simplement parce que notre forme de vie ne peut exister dans les autres domaines.



Cosmos autoreproducteur : *il apparaît comme un vaste embranchement de bulles inflationnaires. Les changements de couleur représentent des « mutations » des lois de la physique par rapport aux univers parents. Les propriétés de l'espace à l'intérieur de chaque bulle ne dépendent pas du moment où cette bulle s'est formée. En ce sens, l'univers dans son ensemble peut être stationnaire, même si l'intérieur de chaque bulle est décrit par la théorie du* Big Bang.

Cela signifie-t-il que la compréhension de toutes les propriétés de notre région de l'univers exigera, en plus d'une connaissance de la physique, une étude approfondie de notre propre nature, peut-être même de la nature de notre conscience ? Une telle conclusion serait assurément l'une des plus inattendues que l'on puisse tirer des développements récents de la cosmologie inflationnaire.

L'évolution de la théorie inflationnaire a donné naissance à un paradigme cosmologique entièrement nouveau, qui diffère considérablement de l'ancienne théorie du *Big Bang*, et même des premières versions du scénario inflationnaire. Dans ce paradigme, l'univers apparaît à la fois chaotique et homogène, en expansion et stationnaire. Notre demeure cosmique grandit, fluctue et se reproduit éternellement sous toutes les formes possibles, comme si elle s'ajustait elle-même à tous les types de vie qu'elle peut accueillir.

Nous espérons que certaines parties de cette nouvelle théorie nous accompagneront encore pendant de nombreuses années. Beaucoup d'autres devront être considérablement modifiées afin de s'adapter aux nouvelles données observationnelles et à l'évolution constante de la théorie des particules élémentaires. Il semble cependant que les quinze dernières années de développement de la cosmologie

aient irréversiblement transformé notre compréhension de la structure et du destin de notre univers, ainsi que de notre propre place en son sein.

Résumé : *Dans cet article célèbre publié en 1994 dans* Scientific American*, Andrei Linde expose une version moderne de la cosmologie inflationnaire : l'inflation chaotique éternelle. Linde commence par rappeler les limites de la théorie classique du* Big Bang *: problème de l'homogénéité de l'univers, de sa platitude géométrique, de sa taille gigantesque, de la rareté des monopôles magnétiques et de l'origine même du* Big Bang*. Selon lui, ces difficultés trouvent une solution naturelle grâce à l'inflation cosmique, une phase d'expansion exponentielle extrêmement rapide survenue dans les tout premiers instants de l'univers. Cette inflation est provoquée par des champs scalaires, liés à la physique des particules élémentaires. Tant que l'énergie potentielle de ces champs reste élevée, l'espace se dilate de manière vertigineuse, agrandissant une région microscopique jusqu'à des dimensions immensément supérieures à l'univers observable. Cette expansion explique pourquoi l'univers apparaît aujourd'hui presque parfaitement homogène et plat. Mais Linde va beaucoup plus loin que les premières versions de l'inflation. Dans son scénario d'« inflation éternelle », les fluctuations quantiques du champ scalaire provoquent localement de nouvelles poussées inflationnaires. Certaines régions cessent d'inflater et deviennent des univers comme le nôtre, tandis que d'autres continuent à se dilater et engendrent sans cesse de nouvelles « bulles d'univers ». L'ensemble forme alors une structure fractale autoreproductrice, potentiellement infinie dans le temps et dans l'espace. Linde suggère également que différentes bulles peuvent posséder des lois physiques différentes : nombre de dimensions, constantes fondamentales ou propriétés des particules pourraient varier d'un domaine à l'autre. Notre univers ne serait alors qu'une région particulière compatible avec l'apparition de la vie consciente. L'article mélange ainsi cosmologie, physique quantique et réflexions presque philosophiques sur la place de l'humanité dans un multivers éternellement créateur de nouveaux univers.*

LECTURES COMPLÉMENTAIRES

Particle Physics and Inflationary Cosmology. Andrei Linde in *Physics Today*, Vol. 40, No. 9, pages 61–68; September **1987**.

The Fractal Dimension of the Inflationary Universe. M. Aryal and A. Vilenkin in *Physics Letters B*, Vol. 199, No. 3, pages 351–357; December 24, **1987**.

Inflation and Quantum Cosmology. Andrei Linde. *Academic Press*, **1990**.

Particle Physics and Inflationary Cosmology. Andrei Linde. *Harwood Academic Publishers*, **1990**.

From the Big Bang Theory to the Theory of a Stationary Universe. A. Linde, D. Linde and A. Mezhlumian in *Physical Review D*, Vol. 49, No. 4, pages 1783–1826; February **1994**.